ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ, НАУКИ О МАТЕРИАЛАХ, МЕТАЛЛУРГИЯ







Научная статья
УДК 621. 762. 1
https://doi.org/10.23947/2541-9129-2022-2-76-83

Определение зависимости механических свойств спеченных дисперсно-упрочненных сплавов на основе железа от условий спекания

М. С. Егоров, Р. В. Егорова
Донской государственный технический университет (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Введение. Проблема создания новых спеченных материалов в настоящее время находится в центре внимания специалистов в области порошковой металлургии. При создании нового класса конструкционных материалов предстоит решить главную проблему — увеличение их прочности. Прочность достигается в первую очередь качественным межчастичным сращиванием дисперсно-упрочненных материалов, которое определяется механическими свойствами сплавов, показывающими степень его завершенности при спекании. В зависимости от плотности исходных материалов, температуры спекания и процентного содержания углерода, который вводится в шихту, меняются механические свойства полученных сплавов. Определение этих изменяющихся свойств является задачей исследований.

Постановка задачи. Для определения прочностных и пластических характеристик спеченных материалов необходимо исследовать, как влияет на материалы вводимый в шихту свободный углерод. Полученные образы с лучшими механическими свойствами взяты для проведения дальнейших исследований.

Теоретическая часть. В качестве теоретического описания проанализированы процессы спекания дисперсно-упрочненных сплавов, гомогенизации углерода и влияние плотности и давления прессования на механические свойства сплавов.

Выводы. Механические свойства полученных в результате исследования образцов спеченных материалов дают основание утверждать, что для достижения их большей прочности достаточно добавления в сплав 0,8 % углерода. Однако добавление углерода на 20–30 % уже снижает пластические характеристики сплавов. Эти данные, полученные в ходе проведенного исследования, должны помочь в определении материала, пригодного для изготовления изделий с высокими эксплуатационными свойствами.

Ключевые слова: спекание, углерод, сплавы, пределы прочности, предел текучести, относительное удлинение, микроструктура поверхности, фактография поверхности разрушения.

Для цитирования: Егоров, М. С. Определение зависимости механических свойств спеченных дисперсно-упрочненных сплавов на основе железа от условий спекания / М. С. Егоров, Р. В. Егорова // Безопасность техногенных и природных систем. — 2022. — № 2. — С. 76–83. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2022-2-76-83

Original article

Determination of mechanical properties of sintered dispersion-strengthened iron-based alloys depending on sintering conditions

M. S. Egorov, R. V. Egorova
Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Introduction. The problem of creating new sintered materials is now in the center of attention of the entire domestic community in the field of powder metallurgy. Today, when creating a new class of structural materials, first of all, it is worth paying attention to their strength properties. The article considers technological features in the formation of high-quality interparticle splicing of dispersion-strengthened materials. High-quality splicing is primarily determined by the

mechanical properties of the alloys, which show the degree of its completeness during sintering. Depending on the density of the materials, the sintering temperature and the percentage of carbon that is introduced into the charge, the mechanical properties of the material also change. The determination of these properties is the main task of the research.

***Problem Statement*.** To determine the strength and plastic characteristics of the materials under consideration, it is necessary to analyze how these characteristics are affected by free carbon introduced into the charge. Determination of mechanical properties will allow us to recommend an alloy with the best characteristics for further research.

***Theoretical Part*.** As a theoretical description, the processes of sintering of dispersion-strengthened alloys, carbon homogenization, and the effect of compaction density and pressure on the mechanical properties of alloys are given.

***Conclusions*.** The obtained mechanical properties show that the addition of 0.8% carbon is sufficient to achieve high strength characteristics. However, the addition of carbon by 20-30% reduces the plastic characteristics of the alloys. The results obtained in this work will help to recommend the material for the manufacture of products with high performance properties.

***Keywords*:** sintering, carbon, alloys, strength limits, yield strength, elongation, surface microstructure, fracture surface factography.

***For citation*:** Egorov M. S., Egorova R. V. Determination of mechanical properties of sintered dispersion-strengthened iron-based alloys depending on sintering conditions. Safety of Technogenic and Natural Systems. 2022;2:76−83. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2022-2-76-83

Введение. Среди номенклатуры порошковых материалов наибольшее применение имеют сплавы на основе железа — стали. При создании новых конструкционных материалов наряду с требованиями повышения качества, надежности и эксплуатационной стойкости выдвигается задача экономии и замены дорогих и дефицитных легирующих элементов на менее дефицитные и невысокой стоимости. Этот факт послужил стимулом для нового витка развития отечественной металлургии в области получения материалов с заданными свойствами, развития методик оценки их свойств. В настоящее время существует большое количество наноразмерных добавок, имеющих различные свойства, причем одна и та же добавка может быть получена разными методами и иметь различные свойства, форму и размеры. Также вызывает особый интерес поиск ответа на вопрос, как введение наноразмерных частиц будет влиять на структурообразование сплавов при различных видах формования или деформации. Основополагающими процессами формирования горячедеформированных сплавов являются структурообразование материала и создание качественных связей между частицами порошка.

Целью работы является определение зависимости параметров предварительного спекания на формирование структуры и свойств высокоплотных дисперсно-упрочненных легированных сплавов. Сделать это необходимо для дальнейшего эффективного использования термической обработки с целью повышения механических и эксплуатационных свойств таких сплавов.

Постановка задачи. Для определения прочностных и пластических характеристик спеченных материалов необходимо проанализировать, как влияет на них вводимый в шихту свободный углерод. Знание этих механических свойств позволит авторам рекомендовать сплав с лучшими характеристиками для проведения дальнейших исследований.

Теоретическая часть. Спекание выполняет главную роль в процессе формирования комплекса физико-механических свойств сложнолегированных порошковых сталей. В дисперсно-упрочненных сплавах в процессе их спекания формируется структура, значительно отличающаяся от структуры литых и кованных материалов. Спеченные прессовки прежде всего — это пористые изделия, в которых количество пор может изменяться от 0,5–2 до 80–90%. Таким образом, для порошковых материалов и сплавов пористость выступает в качестве структурной составляющей. Формой пор, их величиной, морфологией и объемным содержанием определяются физико-химические, механические и другие свойства изделий, а также область их применения. При спекании в составе шихты особую роль играет наличие углерода, который добавляется в нее различными способами. Процентное содержание углерода выбирается исходя из того, какими свойствами должны будут обладать изделия после операции спекания. В нашем случае количество углерода бралось в процентном соотношении от общего объема материала и составляло 0,5 и 0,8 % соответственно [1–3].

Спекание является достаточно важной операцией в порошковой металлургии, и от выбора ее технологических режимов зависит качество получаемых изделий. Целесообразно рассматривать сразу два

последовательных этапа процесса спекания: образование и рост межчастичных контактов (начальная, ранняя стадия процесса), а также повышение плотности спекаемого тела вследствие уменьшения числа и объема пор (промежуточная и поздняя стадии). В реальных условиях оба этих процесса нельзя полностью разделить, они переплетаются и в значительной мере протекают параллельно [2–6].

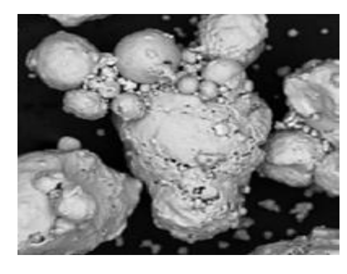
Поскольку процесс гомогенизации не успевает полностью произойти во время спекания сталей, полученных из шихты компонентов, это должно повлечь за собой образование неоднородной структуры. Наличие такой структуры наряду с пористостью делает систему неравновесной, что должно оказывать специфическое влияние на характер процессов, протекающих при нагреве и охлаждении порошковых сталей. Определяющими технологическими параметрами спекания прессовок являются температурный режим, продолжительность спекания, параметры предварительной обработки частиц материала давлением и др. Кроме них, необходимо учитывать определенные особенности, присущие процессам спекания однокомпонентных и многокомпонентных материалов. При спекании однокомпонентных материалов диффузионные процессы в большинстве случаев способствуют уплотнению тел, а в многокомпонентных системах может возникнуть торможение процесса уплотнения и даже расширение спекаемого объема вследствие неравномерности диффузии. Снижение свободной энергии многокомпонентной системы при спекании может происходить не только в результате уменьшения поверхности и числа пор, рекристаллизации и сокращения плотности дефектов кристаллического строения, но и вследствие образования сплавов. При этом использование низкоокисленных и мелкодисперсных частиц сплавов, высокая температура спекания перед прессованием и максимально возможное уплотнение прессовок давлением способствуют процессу сплавообразования [7–10].

Анализируя факторы, влияющие на процесс спекания и соответственно на качество получаемых материалов и изделий из них, нельзя не учитывать такой важный параметр, как фактор времени.

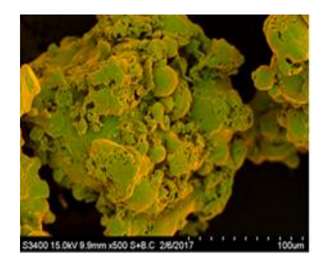
Строение порошковых сталей оказывает влияние не только на температуру, но и на кинетику аустенизации. В условиях скоростного нагрева не только снижается температура начала превращения, но и уменьшается инкубационный период, увеличиваются температурные и временные интервалы превращения. С увеличением пористости, содержания неметаллических включений, повышением дефектности частиц порошка указанные особенности процесса аустенизации усиливаются.

Чтобы получить качественное межчастичное сращивание, которое характеризует высокие механические свойства, необходимо добиться полного растворения углерода в шихте сплава.

В настоящей работе были применены современные порошковые смеси марок ПЛ-Н4Д2М и ПЖРВ 2.200.26 производства АО «Северсталь» (г. Череповец) (рис. 1).



а)



б)

Рис. 1. Рентгеноструктурный анализ частиц сплава: а) сплав ПЛ-Н4Д2М; б) сплав ПЖРВ 2.200.26

Данные об их химическом составе приведены в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав сплавов

Марка сплава	Массовое содержание компонентов, %								
	Mo	Ni	C	O	H	Cu	Si	Mn	P	S
ПЖРВ 2.200.26	–	–	0,09	0,14	–	–	0,014	0,087	0,012	0,005
ПЛ-Н4Д2М	0,45–0,55	3,5–4,5	0,02	0,2	–	1,3–1,7	–	–	0,02	0,02

Химический состав сплавов выбирали исходя из состава легирующих элементов и оценки влияния этих элементов на механические свойства [11–14].

Результаты и их обсуждение. Рассмотрим зависимости механических свойств сплава марки ПЛ-Н4Д2М от плотности изготовленных образцов и количества вводимого в шихту углерода (рис. 2). Спекание

проводили при температуре 1200° С в течение 30 минут. В шихту добавляли соответственно 0,5 и 0,8 % углерода [15–18].

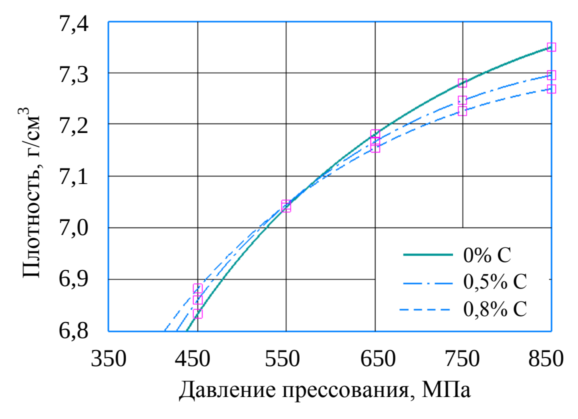


Рис. 2. Уплотняемость шихты сплава ПЛ-Н4Д2М в зависимости от давления прессования и количества вводимого углерода

Образцы для растяжения были выполнены с различной плотностью (от 6,7 до 7,6 г/см^3), с различным содержанием углерода и спекались в среде диссоциированного аммиака в течение 30 минут при температуре Т = 1200° С. Результаты проведенных экспериментов представлены на рис. 3–6.

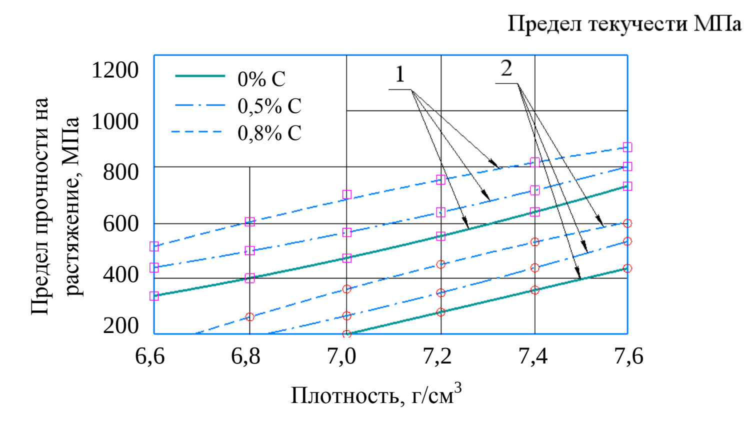


Рис. 3. Зависимости предела прочности на растяжение (прямые 1) и предела текучести (прямые 2) от плотности образцов при спекании при Т = 1200° С в течение 30 минут сплава ПЛ-Н4Д2М (содержание углерода в шихте 0 % С, 0,5 % С, 0,6 % С)

Итоги проведенного эксперимента: предел прочности чистого сплава ПЛ-Н4Д2М показывает при плотности 7,6 г/см^3 значение 750 МПа, а при добавлении углерода в количестве 0,8 % значение возрастает до 900 МПа.

Далее определим зависимость твердости сплава ПЛ-Н4Д2М от плотности образцов и содержания углерода.

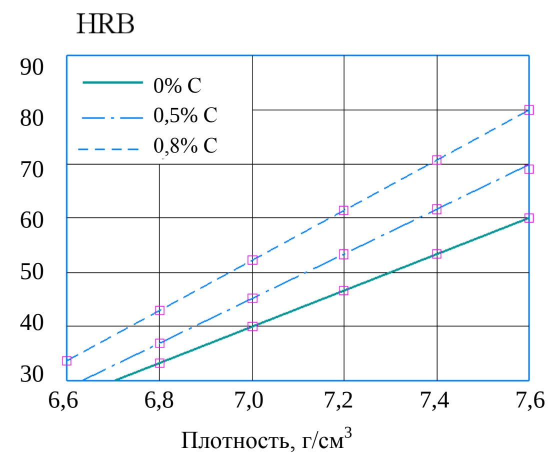


Рис. 4. Зависимость твердости HRB от плотности образцов при спекании при Т = 1200° С в течение 30 минут сплава ПЛ-Н4Д2М (0 % С, 0,5 % С, 0,8 % С)

Отметим изменения относительного удлинения образцов при разрыве в зависимости от их плотности и количества в шихте углерода.

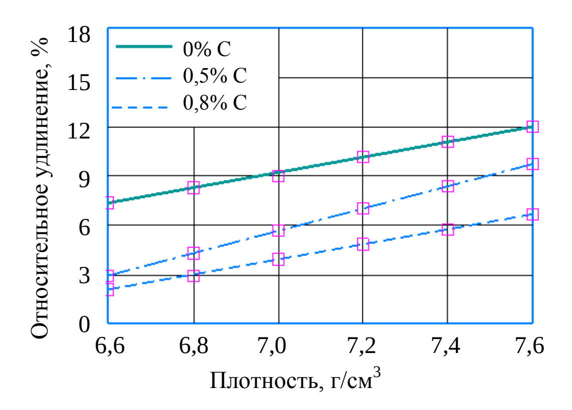


Рис. 5. Зависимость относительного удлинения при растяжении от плотности образцов при спекании при T = 1200° C в течение 30 минут сплава ПЛ-Н4Д2М (0 % C, 0,5 % C, 0,8 % C)

Данные, представленные на рис. 5, показывают, что данный сплав обладает лучшими пластическими характеристиками при растяжении, чем сплавы шведской фирмы Хеганес.

Следующий шаг — определим зависимость усадки образцов от плотности и количества вводимого в шихту углерода.

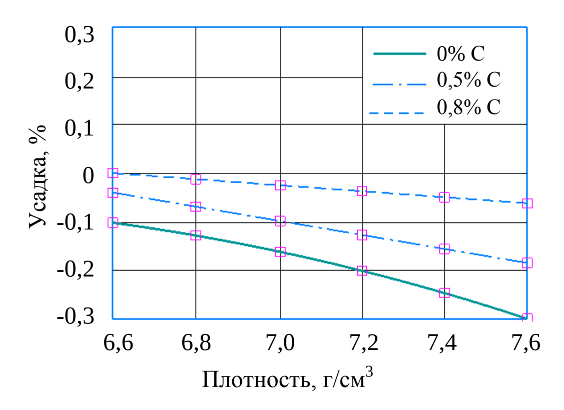


Рис. 6. Зависимость усадки от плотности образцов при спекании при T = 1200° C
в течение 30 минут сплава ПЛ-Н4Д2М (0 % C, 0,5 % C, 0,8 % C)

Теперь проанализируем зависимость механических свойств сплава марки ПЖРВ 2.200.26 от плотности изготовленных образцов и количества вводимого в шихту углерода (рис. 7). Спекание проводили при температуре 1100° C в течение 30 минут. В шихту добавляли соответственно 0,5 и 0,8 % углерода.

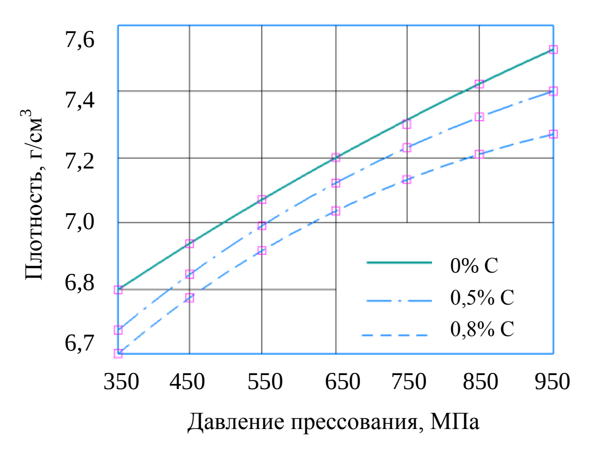


Рис. 7. Уплотняемость шихты сплава ПЖРВ 2.200.26 в зависимости от давления
прессования и количества вводимого углерода

Образцы для растяжения были выполнены с различной плотностью (от 6,7 до 7,6 г/см^3), с различным содержанием углерода и спекались в среде диссоциированного аммиака в течение 30 минут при температуре Т = 1100° С.

Результаты проведенных экспериментов представлены на рис. 8–10.

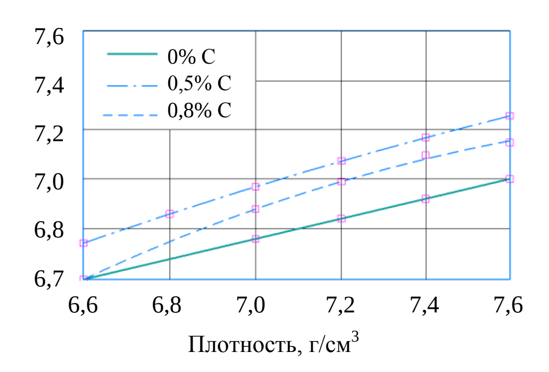


Рис. 8. Зависимости предела прочности на растяжение от плотности образцов при спекании при Т = 1100° С в течение 30 минут сплава ПЖРВ 2.200.26 (содержание углерода в шихте 0 % С, 0,5 % С, 0,8 % С)

Прочностные характеристики данного сплава уступают показателям сплава ПЛ-Н4Д2М. Так, при плотности 7,6 г/см^3 предел прочности чистого сплава ПЖРВ 2.200.26 составляет всего 200 Мпа.

Далее рассмотрим зависимость твердости от плотности образцов и содержания углерода для сплава ПЖРВ 2.200.26.

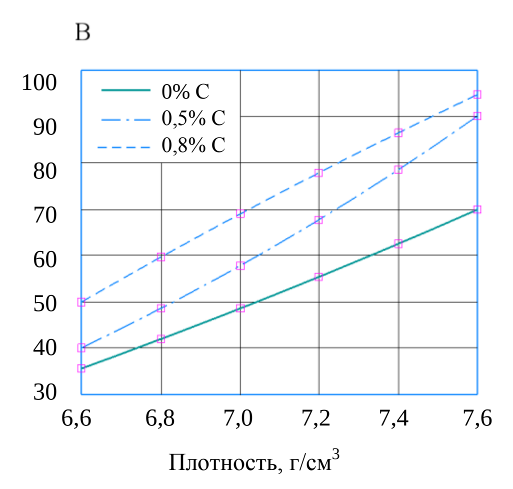


Рис. 9. Зависимость твердости HRB от плотности образцов при спекании при Т = 1100° С в течение 30 минут сплава ПЖРВ 2. 200.26 (0 % С, 0,5 % С, 0,8 % С)

Рассмотрим изменение относительного удлинения образцов при разрыве в зависимости от их плотности и количества в шихте углерода.

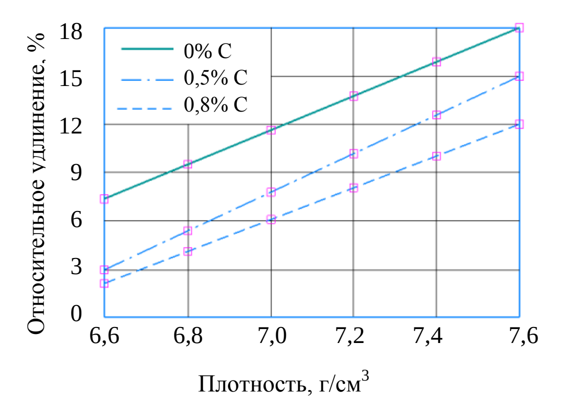


Рис. 10. Зависимость относительного удлинения при растяжении от плотности образцов при спекании при Т = 1100° С в течение 30 минут сплава ПЖРВ 2.200.26 (0 % С, 0,5 % С, 0,8 % С)

Результаты, представленные на рис. 10, показывают, что данный сплав обладает лучшими пластическими характеристиками при растяжении, чем сплав марки ПЛ-Н4Д2М. При содержании углерода 0,8 % в сплаве с плотностью 7,6 г/см^3 показатель относительного удлинения составляет 12 %.

Оценка механических свойств сплавов после спекания показала, что с повышением вводимого в шихту углерода прочностные свойства увеличиваются на 25–30 % по сравнению с чистыми сплавами. Увеличение плотности также сильно влияет на прочностные и пластические свойства таких материалов [19–20].

Выводы. Экспериментальным путем авторами определены зависимости прочностных и пластических характеристик спеченных сплавов от плотности образцов, а также от вводимого в шихту углерода. Установлено, что спекание в течение 30 минут для чистых железных сплавов является минимальным временем, при котором происходит гомогенизация углерода в металлической матрице. Температура спекания в 1 100° С для таких материалов является абсолютно обоснованной, и повышение температуры не будет иметь значения для ускорения процесса спекания. Показаны прочностные свойства рассмотренных сплавов в зависимости от процентного содержания углерода в исходной шихте. Для сплава ПЛ-Н4Д2М оптимальной температурой спекания является 1 200° С, что на 100° С превышает температуру спекания для железных сплавов. Полученные результаты показывают, что наилучшие прочностные свойства достигаются при спекании сплава ПЛ-Н4Д2М+0,8 % С в течение 30 минут при температуре 1200° С.

Библиографический список

1. Егоров, М. С. Методы получения железных и стальных порошков и конструкционных материалов на их основе / М. С. Егоров, Ж. В. Еремеева, Е. В. Егорова. — Ростов-на-Дону : ДГТУ, 2021. — 250 с.

2. Волков, Г. М. Исторические предпосылки и перспективы нанотехнологии / Г. М. Волков // Нанотехнологии: наука и производство. — 2017. — № 2. — С. 23–31.

3. Волкогон, Г. М. Производство металлических нанопорошков химическими способами / Г. М. Волкогон, О. С. Гаврилин, А. Д. Ратнер // Нанотехнологии и информационные технологии — технологии XXI века : матер. Междунар. науч.-практ. конф. — Москва, 2006. — С. 127–129.

4. Егоров, С. Н. Горячедеформированные порошковые низколегированные конструкционные стали : моногр. / С. Н. Егоров, М. С. Егоров. — Новочеркасск : Волгодонский ин-т (фил.) ЮРГТУ (НПИ), 2008. — 54 с.

5. Каблов, Е. Н. Материалы для высокотеплонагруженных деталей газотурбинных двигателей / Е. Н. Каблов, О. Г. Оспенникова, О. А. Базылева // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Серия Машиностроение. — 2011. — № SP2. — С. 13–19.

6. Robert-Perron, E. Tensile properties of sinter hardened powder metallurgy components machined in their green state / E. Robert-Perron, C. Blais, S. Pelletier // Powder Metallurgy — 2009. — Vol. 52, iss. 1. — P. 80–83.

7. Kondo, H. Current trends and challenges in the global aviation industry / H. Kondo, M. Hegedus // Acta Metall. Slovaca. — 2020. — Vol. 26. — P. 141–143.

8. Chang, I. Automotive Applications of Powder Metallurgy in Advanced in Powder Metallurgy / I. Chang, Y. Zhao // Woodhead Publishing Series: Cambridge, UK. — 2013. — P. 493–519.

9. Либенсон, Г. А. Процессы порошковой металлургии: учеб. пособие в 2- х томах / Г. А. Либенсон, В. Ю. Лопатин, Г. В. Комарницкий. — Москва : МИСИС, 2002. — Т. 2. — 320 с.

10. Дорофеев, В. Ю. Горячая штамповка высокохромистого порошкового белого чугуна, микролегированного кальцием / В. Ю. Дорофеев, Х. С. Кочкарова // Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы. Сварка = Powder Metallurgy: Surface Engineering, New Powder Composite Materials. Welding : сб. докл. 10-го междунар. симп. — Минск : Беларуская наука, 2017. — С. 93–104.

11. Chagnon, Fr. Effect of Ni addition route on static and dynamic properties of Fe-2Cu-1.8Ni-0.5Mo-0.65C and Fe-2Cu-1.8Ni-0.5Mo-0.85C PM steels / Fr. Chagnon // Adv. Powder Metall. Part. Mater. — 2012. — Vol. 2. — P. 10.73–10.84.

12. Анциферов, В. Н. Механика процессов прессования порошковых и композиционных материалов / В. Н. Анциферов, В. Е. Перельман. — Москва : Грааль, 2001. — 631 с.

13. The Influence of Silicon on the Mechanical Properties and Hardenability of PM Steels / C. Schade, T. Murphy, A. Lawley, R. Doherty // Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials - 2013, Proceedings of the 2013 International Conference on Powder Metallurgy and Particulate Materials, PowderMet. — 2013. — P. 754–772.

14. Исследование процессов термической обработки порошковых сталей, легированных наноразмерными добавками / Ж. В. Еремеева, Н. М. Никитин, Н. П. Коробов, Ю. С. Тер-Ваганянц // Нанотехнологии: наука и производство. — 2016. — № 1 (38). — С. 63–74.

15. Порошковая металлургия в автомобилестроении и других отраслях промышленности / В. Ю. Лопатин, Ж. В. Еремеева, Г. Х. Шарипзянова, Н. М. Ниткин. — Москва : Университет машиностроения, 2014. — 276 с.

16. Износостойкие композиционные материалы / Ю. Г. Гуревич, В. Н. Анциферов, Л. М. Савиных [и др.]. — Екатеринбург : УрО РАН, 2005. — 215 с.

17. Скориков, Р. А. Электроимпульсное спекание порошковой углеродистой стали, упрочненной наночастицами / Р. А. Скориков // Нанотехнологии: наука и производство. — 2015. — № 2 (34). — С. 34–40.

18. Дьячкова, Л. Н. Влияние нанодисперсных добавок на структуру и свойства порошковой углеродистой и высокохромистой стали / Л. Н. Дьячкова, М. М. Дечко // Нанотехнологии: наука и производство. — 2015. — № 3 (35). — С. 5–14.

19. Панов, В. С. Влияние наноразмерных легирующих добавок на структуру и свойства порошковых углеродистых сталей / В. С. Панов, Р. А. Скориков // Нанотехнологии: наука и производство. — 2015. — № 3 (35). — С. 40–45.

20. Егоров, М. С. Пластичность композиционных материалов с определением температурных режимов горячей штамповки, исключающих появление дефектов в структуре материала / М. С. Егоров, Р. В. Егорова // Заготовительные производства в машиностроении. — 2019. — Т. 17, № 2. — С. 66–72.

Поступила в редакцию 15.04.2022
Поступила после рецензирования 20.05.2022
Принята к публикации 20.05.2022

Об авторах:

Егоров Максим Сергеевич, заведующий кафедрой «Инженерная и компьютерная графика» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, доцент, ORCID, aquavdonsk@mail.ru.

Егорова Римма Викторовна, доцент кафедры «Кибербезопасность» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, доцент, ORCID, rimmaruminskaya@gmail.com.

Заявленный вклад соавторов:

М. С. Егоров — формирование основной концепции, цели и задачи исследования, проведение расчетов, подготовка текста, формирование выводов; Р. В. Егорова — научное руководство, анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов.